

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, А.О. КОЛЕСНИЧЕНКО, К. А. ЯЩЕНКО

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИГНАЛУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Виконано аналіз способів опису інформаційного сигналу. Наведено математичні залежності, що традиційно застосовуються в моделюванні інформаційних сигналів різних типів. Розглянуто загальні питання алгоритмізації обробки, прийому, аналізу, фільтрації і візуалізації вхідного сигналу з пристрою на персональний комп'ютер. Охарактеризовані методи математичного опису та моделювання детермінованого інформаційного сигналу з використанням рядів Фур'є. Охарактеризовані способи фільтрації інформаційного детермінованого сигналу. Наведено теоретичний базис фільтрування сигналу на основі фільтра Калмана. Наведено математичний опис процедури реалізації фільтрації сигналу по Калману. Охарактеризовано загальний алгоритм статистичної обробки масиву вхідних даних через наведення блоку з сєм окремих алгоритмів та загальний опис принципу реалізації інших. Наведено алгоритм збору інформації про поточний сигнал програмними засобами за допомогою дискретного циклічного стекового введення-виключення елементів інформаційного пакета. Наведено алгоритм статистичної обробки вхідного інформаційного пакета даних в системі пристрій-персональний комп'ютер. Наведено алгоритмічні рішення для імплементації фільтра Калмана для подальшої візуальної оцінки обробленого інформаційного пакета даних. Представлений алгоритм комплексної візуалізації інформаційного, відфільтрованого сигналу і виявлених перевищень сигналом встановленого граничного рівня. Наведено реалізацію програмного засобу для комплексної обробки вхідного сигналу, його візуалізації засобами Windows GDI і OpenGL, статистичної пакетної обробки готівкового блоку даних для вхідного сигналу, відсіву шуму на базі моделі вихідного сигналу і уточнюючої фільтрації за алгоритмом Калмана. Охарактеризовані функціональні можливості і інтерфейс розробленого додатка. Наведено оцінку можливості обробки вхідних сигналів.

Ключові слова: програмний засіб, інформаційний сигнал, статистична обробка, візуалізація, виявлення меж, аналіз в реальному часі.

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, А.А. КОЛЕСНИЧЕНКО, Е.А. ЯЩЕНКО

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИГНАЛА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Выполнен анализ способов описания информационного сигнала. Приведены математические зависимости, традиционно применяемые в моделировании информационных сигналов различных типов. Рассмотрены общие вопросы алгоритмизации обработки, приема, анализа, фильтрации и визуализации входного сигнала с устройства на персональный компьютер. Охарактеризованы способы математического описания и моделирования детерминированного информационного сигнала с использованием рядов Фурье. Охарактеризованы способы фильтрации информационного детерминированного сигнала. Приведен теоретический базис фильтрования сигнала на основе фильтра Калмана. Приведено математическое описание процедуры реализации фильтрации сигнала по Калману. Охарактеризован общий алгоритм статистической обработки массива входных данных. Приведен алгоритм сбора информации о текущем сигнале программными средствами посредством дискретного циклического стекового ввода-исключения элементов информационного пакета. Приведен алгоритм статистической обработки входного информационного пакета данных в системе устройство-персональный компьютер. Приведены алгоритмические решения для имплементации фильтра Калмана для последующей визуальной оценки обработанного информационного пакета данных. Представлен алгоритм комплексной визуализации информационного, отфильтрованного сигнала и выявленных превышений сигналом установленного предельного уровня. Приведена реализация программного средства для комплексной обработки входного сигнала, его визуализации средствами Windows GDI и OpenGL, статистической пакетной обработки наличного блока данных для входного сигнала, отсева шума на базе модели исходного сигнала и уточняющей фильтрации по алгоритму Калмана. Охарактеризованы функциональные возможности и интерфейс разработанного приложения. Приведена оценка возможности обработки входных сигналов.

Ключевые слова: программное средство, информационный сигнал, статистическая обработка, визуализация, выявление пределов, анализ в реальном времени.

S. Yu. PLESNETSOV, A.O. KOLESNYCHENKO, K.A. YASCHENKO

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE SOLUTION FOR REAL-TIME STATISTICAL SIGNAL ANALYSIS

The analysis of the information signal description was performed. Mathematical dependences traditionally used in modeling information signals of various types are given. The general issues of algorithmization of processing, receiving, analyzing, filtering and visualizing the input signal from the device to a personal computer are considered. The ways of mathematical description and modeling of a deterministic information signal using Fourier series are characterized. The ways of filtering informational deterministic signal are characterized. The theoretical basis for filtering the signal based on the Kalman filter is given. A mathematical description of the procedure for implementing signal filtering according to Kalman is given. The general algorithm of statistical processing of the array of input data is characterized. An algorithm for collecting information about the current signal using software is given by means of discrete cyclic stack input-exclusion of information package elements. An algorithm for statistical processing of the input information data packet in the device-personal computer system is given. Algorithmic solutions for the implementation of the Kalman filter for the subsequent visual assessment of the processed information data packet are presented. An algorithm for complex visualization of the information, filtered signal and the detected signal exceedances of the set limit level is presented. An implementation of software for complex processing of the input signal, its visualization by means of Windows GDI and OpenGL, statistical batch processing of the available data block for the input signal, noise elimination based on the original signal model and refinement filtering using the Kalman algorithm is given. The functionality and interface of the developed application are characterized. The evaluation of the possibility of processing input signals is given.

Keywords: software, information signal, statistical processing, visualization, detection of limits, real-time analysis.

Вступ. Важливою задачею аналізу та обробки інформації у сучасній промисловості є задача динамічного опрацювання потоку даних із подальшою його візуалізацією у режимі реального часу. Потік даних формується на базі дискретної вибірки

елементів базового інформаційного сигналу, яка зазвичай вимагає додаткового фільтрування.

Інформація сприймається споживачем через сигнали, які генеруються або безпосередньо джерелом, або за допомогою генераторів, що не зв'язані з

джерелом (локація). Сигнали мають енергетичну та матеріальну основу – світлові потоки, звукові хвилі, теплове випромінювання, зображення точок, неоднорідності електричного і магнітного полів. Сигналами можуть бути документи, книжки, графіки, таблиці і т. ін. Отже, сигнали різняться за фізичною природою. В електронних системах сприйняття сигналів різної фізичної природи здійснюється первинними перетворювачами, які перетворюють інформаційний параметр в сигнал, що є зручним для подальшої обробки.

1. Теоретичні питання алгоритмізації обробки сигналу. Найпоширенішим видом інформаційного сигналу є детермінований сигнал. Детермінований сигнал характеризується визначеністю його значень в будь-які моменти часу (задаються певною визначеною функцією часу). Випадковий сигнал характеризується тим, що його значення в будь-який момент часу є випадковими величинами. Випадковими можуть бути як корисні (інформаційні) сигнали, так і шкідливі сигнали – завади, які перешкоджають сприйняттю інформаційних сигналів.

Як приклад детермінованого сигналу можна навести синусоїдальну хвилю, яка графічно описується синусоїдою. Синусоїда – це функція часу t , яка записується так:

$$F(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

де величину сигналу визначає коефіцієнт A , названий амплітудою;

ω – кутова частота;

θ – початкова фаза.

Синусоїда разом з трикутним, пілоподібним, прямокутним та іншими сигналами належить до періодичних сигналів, тобто до таких сигналів, які повторюють свою форму через деякий сталий проміжок часу.

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонічних коливань [1]. Сукупність простих гармонічних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його спектром. Якщо спектр сигналу є необмеженим, то при визначенні ширини нехтують гармоніками, амплітуди яких невеликі й не перевищують певного (заданого) рівня. Найбільш часто користуються рівнем 0,707 за амплітудою або 0,5 за потужністю від максимального значення.

Для будь-якого сигналу зазвичай значним елементом в його структурі є стохастична складова, яку можна компенсувати за допомогою статистичної обробки даних. Статистична обробка розглядається в межах методики, описаної в [2] і яка зводиться до наступного:

1) проводять n спостережень (одиничних вимірювань) і фіксують n результатів вимірювань одного і того ж значення фізичної величини x_1, x_2, \dots, x_n ;

2) виключають відомі систематичні похибки результатів вимірювань і отримують виправлений результат x_1, x_2, \dots, x_n ;

3) знаходять середнє арифметичне значення виправлених результатів і приймають його за результат вимірювань

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i; \quad (2)$$

4) обчислюють оцінку середньоквадратичного відхилення результату вимірювань;

5) знаходять відхилення від середнього арифметичного

$$\rho_1 = \bar{x} - x_1, \rho_2 = \bar{x} - x_2, \dots, \rho_n = \bar{x} - x_n; \quad (3)$$

6) перевіряють правильність обчислень і якщо вони вірні, то сума відхилень $= 0$, $\sum_{i=1}^n \rho_i = 0$;

7) обчислюють квадрати відхилень від середнього, $\rho_1^2, \rho_2^2, \dots$;

8) визначають оцінку середньоквадратичного відхилення

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \rho_i^2}; \quad (4)$$

9) знаходять значення відносної середньоквадратичної випадкової похибки $\delta = \frac{\delta_n}{\bar{x}}$;

10) обчислюють оцінку середньоквадратичного відхилення результату вимірювання $\delta_n = \frac{\delta}{\sqrt{n}}$;

11) перевіряють гіпотезу про те, що розподіл результатів вимірювання є гаусівським (нормальним);

12) обчислюють довірчі межі випадкової похибки результатів вимірювань:

а) задаються коефіцієнти довіри α (довірчої ймовірності),

б) за спеціальними таблицями визначають значення коефіцієнта β , відповідне заданої довірчої ймовірності і числу спостережень,

в) знаходять значення $\delta = \beta \delta_n$,

г) обчислюють довірчі межі $(\bar{x} - \delta; \bar{x} + \delta)$,

д) визначають довірчий інтервал $\gamma = 2\delta$,

е) записують результат вимірювань.

2. Синтез алгоритму програмного засобу для динамічної обробки сигналу. Для реалізації програмного засобу, який буде здатним обробляти в реальному часі сигнал, що надходить з пристрою, і здійснювати його візуалізацію, необхідно розробити ряд алгоритмів, а саме:

1) Алгоритм побудови активного масиву даних для обробки;

2) Алгоритм статистичної обробки масиву даних;

3) Алгоритм фільтрації сигналу;

4) Алгоритм генерації тестового сигналу.

Реалізація генератора тестового сигналу, який створює комбінований сигнал зі структурою сукупності прямокутних імпульсів та шуму, з якого необхідно виділити інформаційний сигнал.

Генерація відбувається за залежністю, наведеною у вигляді формули 5:

$$x_{si} = t_{min} + \Delta t \cdot i, \quad (5)$$

де x_s – масив координат за часом;

x_{si} – i -й елемент масиву;

t_{min} – початковий момент часу;

Δt – крок між двома збереженими значеннями сигналу;

Signal масив значень інформаційного сигналу. Структуру сигналу наведено на рис. 1.

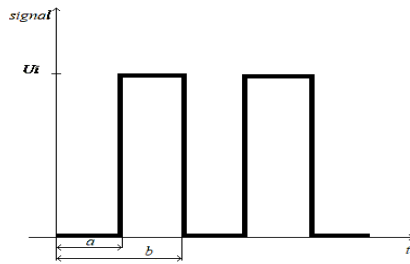


Рис. 1 – Масив значень інформаційного сигналу

Розрахунок масиву значень інформаційного сигналу наведено у формулі 6:

$$signal_i = U \cdot kk \quad (6)$$

де U – значення сигналу;

kk – коефіцієнт наявності сигналу.

noise – масив шуму, що генерується за допомогою генератору випадкових чисел в інтервалі \pm

summary – комбінація сигналів *signal* і *noise*, отримана через визначення суми елементів масивів з ідентичними індексами.

Алгоритм генератору наведено на рис. 2.

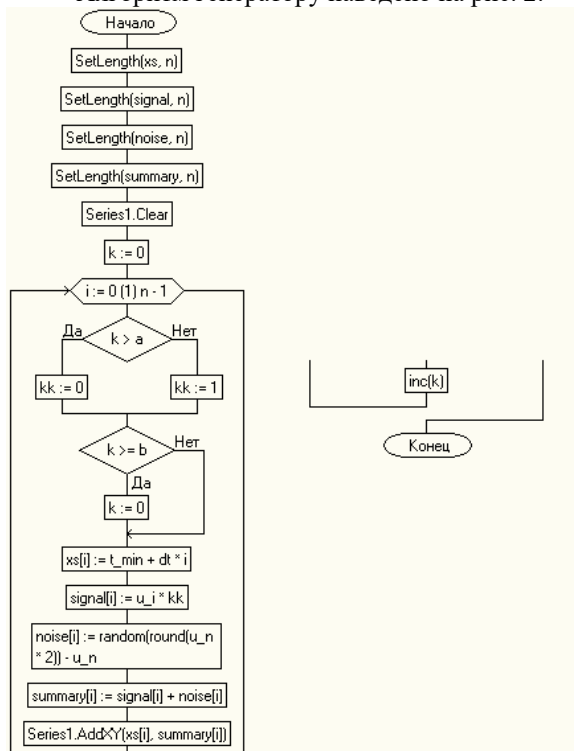


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму генерації сигналу

Для отриманого від генератору чи пристрою масиву даних виконується статистична обробка.

Реалізація статистичної обробки масиву даних на основі методики [3]. Визначаються середнє арифметичне значення \bar{x} масиву даних x_i , квадратичне σ^2 , і середньоквадратичне відхилення σ , коефіцієнт Стюдента (з допомогою описаної вище функцією *getz*), значення розбиваються на групи числа g ,

отримані сукупності даних накладаються на діаграму нормального розподілу ρr .

Процедура, призначена для пошуку коефіцієнта Стюдента z для заданого числа n елементів і заданої довірчої ймовірності p . Для визначення значення коефіцієнта z і використовуються спеціалізовані файли баз даних, що зберігаються в вигляді структурованого тексту. Файли існують окремо для значень $p < 20$, до них додається основна база значень для $p \geq 20$. Структура файлу:

<довірча ймовірність >

<значення коефіцієнта z >

При візуалізації виконується додаткове фільтрування за алгоритмом Калмана.

Фільтр Калмана використовує динамічну модель системи (наприклад, фізичний закон руху), відомі керуючі впливи і безліч послідовних вимірювань для формування оптимальної оцінки стану [4]. Алгоритм складається з двох повторюваних фаз: передбачення і коригування. На першому розраховується передбачення стану в наступний момент часу (з урахуванням неточності їх вимірювання). На другому, нова інформація з датчика коригує передбачене значення (також з урахуванням неточності і зашумленості цієї інформації) [5].

Початкове значення: \hat{x}_{k-1} та P_k^-

Передбачення

1 Передбачення стану системи: $\hat{x}_k^- = F \hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$

2 Передбачення помилки коваріації: $P_k^- = F P_k + F^T + Q$

Коригування

1 Розрахунок посилення Калмана: $K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$

2 Оновлення оцінки з урахуванням вимірювання z_k : $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$

3 Оновлення помилки коваріації: $P_k = (I - K_k H) P_k^-$

3. Реалізація розробленого алгоритму у вигляді додатку для MS Windows. Для реалізації програмного засобу на основі алгоритмів, описаних вище, розроблено проект структури інтерфейсу додатку (3) [6]. Інтерфейс планується з урахуванням ергономіки користування та за логічною течією послідовності виконання операцій. У верхній частині вікна розташовуються засоби вводу параметрів сигналу (1). У лівій частині – панель для налаштувань та контролю параметрів роботи фільтрації (2), а також сигналізатор статусу генератору реального часу (3).

Центральну частину вікна займає засіб візуалізації у вигляді системи графіків на базі компоненту TChart (4), на якій формуються дані обробки сигналу у вигляді двох кривих.

У правій частині вікна має знаходитись модуль налаштування і виводу даних модуля статистичної обробки (5).

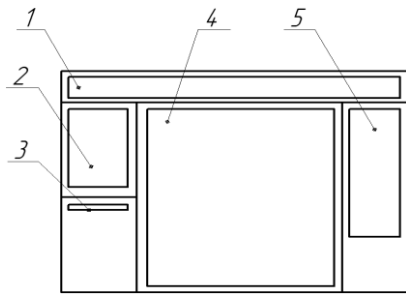


Рис 3. Проектування інтерфейсу програмного засобу
1 – налаштування сигналу; 2 – налаштування генератора; 3 – налаштування генератора реального часу; 4 – візуалізація сигналу; 5 – модуль статистичної обробки

На базі вказаних вище рішень розроблено програмний засіб, скріншот якого наведено на рис. 4. Структуру інтерфейсу модифіковано з урахуванням додаткових задач – виділено область для налаштування фільтра Калмана (3), зону звіту (8).

Реалізований програмний модуль орієнтовано на статичний аналіз блоку сигналу, що подано з пристрою чи згенеровано генератором віртуального сигналу.

Фільтр Калмана дозволяє здійснювати додаткові згладжування сигналу, забезпечуючи більш відповідний реальності вид огинаючої з вилученням значної частки впливу шуму. На рис. 5 наведено структуру сигналу без фільтра Калмана (рис. 5а) та із ним (рис. 5б).

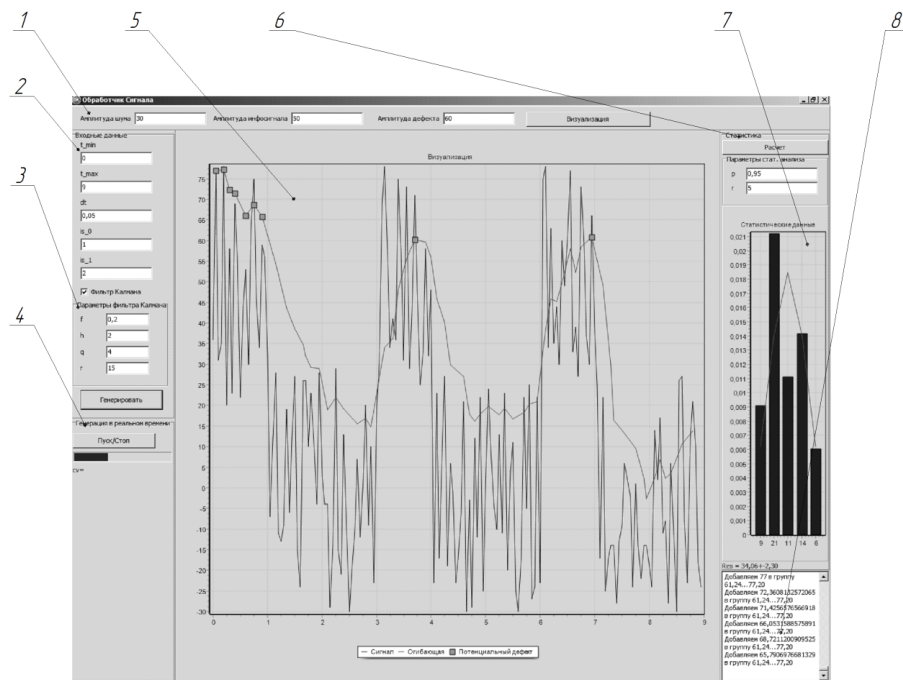


Рис. 4 – Інтерфейс програмного засобу
1 – параметри сигналу; 2 – вхідні дані генератора; 3 – параметри фільтра Калмана; 4 – параметри генератора реального часу; 5 – візуалізація графіку; 6 – параметри модуля статистичної обробки; 7 – візуалізація статистичного розподілу; 8 – звіт

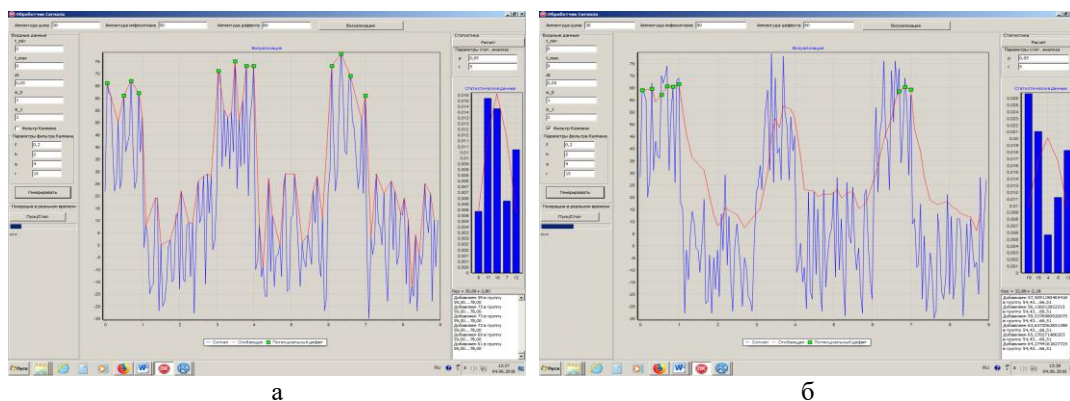


Рис. 5 – Візуалізація сигналу та огинаючої
а - без фільтрування за Калманом; б - з фільтруванням за Калманом

Висновки

1) Спектральні характеристики сприймаються споживачем через сигнали, які генеруються джерелом, або за допомогою генераторів, що не зв'язані з локацією. Передача інформації відбувається за допомогою повідомлень – послідовності сигналів в часі або просторі, відповідно повідомлення будуть часові або просторові. Детермінований сигнал характеризується визначеністю його значень в будь-які моменти часу.

2) Для розробки та реалізації алгоритму обробки та візуалізації сигналу розроблено і реалізовано наступні підалгоритми: Button1Click – ініціює всі основні процедури обробки, візуалізації та введення сигналу, Calc_data – розраховує діапазони значень масивів і безрозмірний вираз таймінгів генератора умовного сигналу, Calccurve – розраховує точки на огинаючий вихідного сигналу та шуму, Extr – виявляє min або max в наявному масиві даних, Getz – визначає значення коефіцієнта Стюдента z в рамках функції, Read_input – зчитує введені початкові значення, GLCadencer1Progress – відповідає за динамічне перемальовування сплайна. Correct – процедура розрахунку згладженої точки за методикою Калмана.

3) Для реалізації програмного засобу на основі алгоритмів, розроблено проект структури інтерфейсу програмного засобу, реалізований програмний модуль орієнтований на статичний аналіз блоку сигналу, що подано з пристрою чи сформовано генератором віртуального сигналу. Фільтр Калмана дозволяє здійснювати додаткові згладжування сигналу.

Список літератури

1. Й. Й. Білінський, К. В. Огороднік, М. Й. Юкиш. *Електронні системи: навчальний посібник*. Вінниця : ВНТУ, 2011. – 208 с.
2. В. В. Жук, Г. И. Натансон. *Тригонометрические ряды Фурье и элементы теории аппроксимации* / – Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 188 с.
3. П. В. Новицкий, И. А. Зограф. *Оценка погрешностей результатов измерений*. Ленинград. – 248 с. – (1985).
4. Захабреный С. Фільтр Калмана – Введение [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://habr.com/post/140274/>
5. Худавердян Д. Фільтр Калмана [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://habr.com/post/166693/>.
6. Фленов М.Е. *Библия Delphi. – 3-е изд., перераб. и доп.* СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 688 с.: ил.

References (transliterated)

1. J. J. Bilynskyj, K. V. Oghorodnik, M. J. Jukysh. *Elektronni systemy: navchalnyj posibnyk* [Electronic Systems Handbook]. Vinnycja : VNTU, 2011. – 208 s.
2. V. V. Zhuk, G. I. Natanson. *Trygonometrycheskie ryady Furje y elementy teoryi approksymacyi* [Trigonometric Fourier Rows and Elements of Approximation Theory]. Leninghrad: Yzd-vo Leninghr. un-ta, 1983. – 188 p.
3. P. V. Novyckij, Y. A. Zoghraf. *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov yzmerenij* [Error Evaluation in Technical Measurements]. Leninghrad. – 248 p. – 1985.
4. Zakhabrenyj S. *Fyl'tr Kalmana – Vvedenye* [Kalman Filter – Introduction] [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu do resursu: <https://habr.com/post/140274/>
5. Khudaverdjan D. *Fyl'tr Kalmana* [Kalman Filter] [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu do resursu: <https://habr.com/post/166693/>.
6. Flenov M.E. *Byblyja Delphi. – 3-e yzd., pererab. y dop* [Delphi Bible – 3rd ed., reworked and extended]. Saint Petersburg. BKHV-Peterburgh, 2011. – 688 p.: ill.

Поступила (received) 23.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com

Колесниченко Артем Олександрович (Колесниченко Артем Александрович, Kolesnychenko Artiom Oleksandrovych) – магістрант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; e-mail: kolesnichenko.artiom@mail.ru

Яценко Катерина Андріївна (Яценко Екатерина Андреевна, Yaschenko Kateryna Aandryivna) – магістрант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; e-mail: kyashhenko96@mail.ru